

## XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

### “MICROGERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA”

*Renato Swerts Carneiro Dias Jr. (1), Gustavo Meirelles Lima (2), Augusto Nelson Carvalho Viana (3), Edson da Costa Bortoni (4)*

- (1) S.O.ESCO Serviços de Consultoria e Engenharia, Incubadora de Empresas de Base Tecnológica – INCIT, Itajubá, MG, Brasil. [renato@soesco.com.br](mailto:renato@soesco.com.br)
- (2) S.O.ESCO Serviços de Consultoria e Engenharia, Incubadora de Empresas de Base Tecnológica – INCIT, Itajubá, MG, Brasil. [gustavo@soesco.com.br](mailto:gustavo@soesco.com.br)
- (3) Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN, Grupo de Energia – GEN. Itajubá, MG, Brasil, [augustonelsonviana@yahoo.com.br](mailto:augustonelsonviana@yahoo.com.br)
- (4) Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Centro de Excelência em Eficiência Energética – EXCEN, Itajubá, MG, Brasil, [bortoni@excen.com.br](mailto:bortoni@excen.com.br)

#### RESUMO

Muitos sistemas de abastecimento de água possuem um potencial de geração hidrelétrica intrínseco à sua operação, permitindo redução de custos através da autoprodução de energia. O uso de bombas funcionando como turbina e motor operando como gerador apresenta vantagens técnicas, operacionais e econômicas comparado a outros grupos geradores. No entanto sua aplicação requer o correto levantamento do potencial hidráulico, seleção de componentes e atender aos requisitos técnicos para interligação a rede elétrica. Este trabalho apresenta estudos para implantação de um sistema de microgeração distribuída utilizando grupo gerador bomba funcionando como turbina (BFT), analisando as normas relacionadas e testes em laboratório.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Microgeração Distribuída, Bombas Funcionando como Turbina, Gerador de Indução, Sistemas de Abastecimento de Água.

#### ABSTRACT

Many water supply systems have a potential for hydropower generation intrinsic to their operation, allowing cost reduction through self-generation of energy. The use of pumps running as a turbine and motor operating as generator offers technical, operational and economical advantages compared to other generators groups. However its application requires the correct survey of the hydraulic potential, selection of components and technical requirements for interconnection to the power grid. This paper presents studies to implement a micro generation system using pump a turbine (PAT) and induction generator, analyzing the related regulations and standards and laboratory tests.

**Key words:** Energy efficiency, Distributed Micro Generation, Pump as Turbines (PAT), Induction Generator, Water Supply Systems.

#### SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

**Renato Swerts Carneiro Dias Jr.** Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), onde atualmente participa do programa de Mestrado em Engenharia Elétrica. Tem como linhas de pesquisa e áreas de interesse: Eficiência Hidroenergética e Geração de Energia. Atua em projetos de eficiência energética, ensaios de usinas hidrelétricas e sistemas de microgeração de energia. Gerente de projetos na empresa incubada S.O.ESCO, participa como pesquisador em projetos do Centro de Excelência em Eficiência Energética (EXCEN) e Grupo de Energia (GEN), na UNIFEI.

## INTRODUÇÃO

O uso racional de energia ganha cada vez mais importância em todo o mundo, e os mais diversos setores da economia têm buscado soluções não só para uma melhor eficiência energética em seus processos, mas também buscando aproveitar cada vez mais as fontes de geração disponíveis. Neste contexto o crescente desenvolvimento tecnológico de sistemas de geração de energia tem favorecido a expansão da produção em pequena escala, próxima ao local de consumo, utilizando principalmente fontes renováveis como solar, eólica, hidráulica e biomassa. Este tipo de produção é conhecido por microgeração ou geração distribuída.

De acordo com LIMA (2012), em sistemas de abastecimento de água os grandes consumidores de energia são as estações elevatórias, e, portanto, são as unidades do sistema onde há maior preocupação em implementar medidas de eficiência energética. Porém, muitos sistemas se beneficiam de uma topografia privilegiada, realizando a captação e distribuição de água por gravidade, evitando os gastos com bombeamento. Entretanto, toda a energia potencial disponível é dissipada, seja em válvulas redutoras de pressão ou em reservatórios. Assim, toda a energia disponível que poderia ser aproveitada acaba sendo desperdiçada.

Atualmente ainda existem barreiras de ordem técnica, econômica e regulamentar que dificultam a implantação destas microcentrais. Entretanto a microgeração pode trazer grandes benefícios a diferentes setores da economia, desde que a energia produzida seja consumida localmente. Estes benefícios podem ser maximizados quando a fonte de energia é desperdiçada no processo. No caso de sistemas de abastecimento de água esta perda é resultado do controle de pressão nas tubulações, seja ela através de válvulas redutoras de pressão ou reservatórios.

Os custos da geração de energia nestes casos são reduzidos, já que diversos componentes necessários já existem no local, tais como tubulações, válvulas e câmara de carga. Porém, devido à baixa potência disponível encontrada nestes locais, o custo dos equipamentos de geração, representados pelo conjunto turbina e gerador, pode inviabilizar o projeto. Uma alternativa encontrada para reduzir o custo é utilizar uma bomba funcionando como turbina (BFT) e o motor de indução como gerador.

Neste trabalho foram realizados estudos acerca do levantamento de potencial energético em sistemas de abastecimento de água utilizando grupos geradores bombas funcionando como turbina. Além disso, foram realizados testes em bancada de laboratório para analisar o comportamento da BFT e do gerador

de indução frente aos requisitos técnicos para conexão a rede elétrica de distribuição de energia.

## MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De maneira geral a microgeração está relacionada a geração de energia de forma descentralizada e próxima aos pontos de consumo. Comparado ao modelo de geração centralizada através de grandes usinas, a geração distribuída apresenta diversas vantagens:

- Redução de perdas na transmissão da energia;
- Melhor aproveitamento de fontes renováveis de geração;
- Ideal para locais com baixa densidade populacional ou de difícil acesso da rede elétrica;
- Maior estabilidade da tensão;
- Melhor planejamento de expansão da oferta de energia;
- Aumento da confiabilidade no abastecimento;
- Redução dos impactos ambientais.

No entanto, sua aplicação ainda enfrenta barreiras de ordem técnica, regulamentar, econômica e informativa que ainda devem ser superadas para que este modelo se desenvolva ainda mais. Entre as principais dificuldades pode-se citar:

- Complexidade da operação da rede, que passa a ter fluxo bidirecional;
- Alteração nos procedimentos de operação, controle e proteção da rede de distribuição;
- Controle da tensão, especialmente em períodos de baixa demanda;
- Alteração dos níveis de curto-circuito das redes;
- Qualidade da energia da rede;
- Intermitência da geração seja pela incerteza da disponibilidade de combustível (vento, radiação, água, etc.), seja pela falha dos equipamentos;
- Alto custo de implantação e tempo de retorno elevado dos investimentos.

## Regulamentação

No Brasil, a Microgeração Distribuída foi definida pela Resolução 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como sendo qualquer central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada conectada na

rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Esta mesma resolução estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e definiu ainda o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade.

Os requisitos técnicos e operacionais para acesso a rede elétrica de distribuição são estabelecidos pelos Procedimentos de Rede – PRODIST. Estes requisitos estabelecem os requisitos mínimos, e são complementados por normas técnicas nacionais e internacionais. As concessionárias e distribuidoras podem ainda definir critérios próprios para acesso a sua rede de distribuição.

## MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

De acordo com o Manual de Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas, da ELETROBRÁS as microcentrais hidrelétricas são definidas como aproveitamentos hidrelétricos de até 100 kW de potência instalada como apresenta a Tabela 1. Podem ser caracterizados ainda de acordo com sua queda, em baixa, média ou alta.

**Tabela 1. Classificação de hidrelétricas**

Classificação	Potência – P (kW)
Micro	$P < 100$
Mini	$100 < P < 1.000$
Pequenas	$1.000 < P < 30.000$

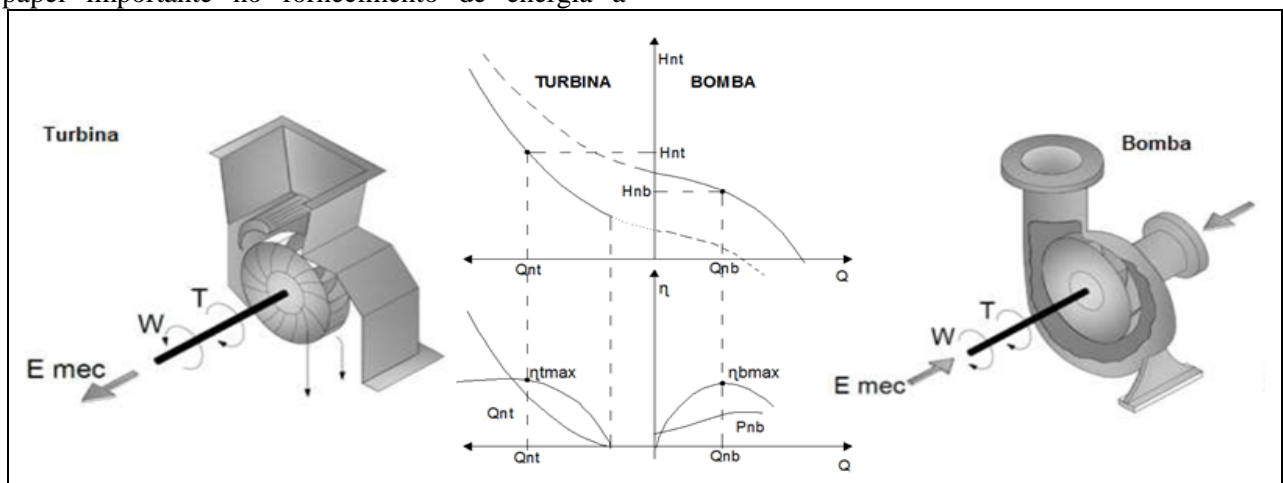
As microcentrais hidrelétricas desenvolvem um papel importante no fornecimento de energia a

comunidades isoladas não atendidas pelas redes de distribuição de energia. Estes pequenos aproveitamentos principalmente são caracterizados como “a Fio d’Água”, onde a vazão de água utilizada no aproveitamento é menor que a vazão de estiagem do rio. Nestes casos as barragens e reservatórios têm apenas a função de desviar a água resultando em menores impactos sociais e ambientais.

De maneira geral, além da barragem e câmaras de adução de água, compõem uma microcentral os condutos, grupo gerador com suas proteções e controles, e linha de transmissão até os pontos de consumo. O custo dos equipamentos de geração, representados pelo conjunto turbina e gerador é uma desvantagem da microgeração, que pode inviabilizar o projeto. Uma forma de minimizar os gastos iniciais da microgeração seria a utilização de equipamentos de série, que possuem um custo reduzido. Esses equipamentos podem ser, por exemplo, uma bomba funcionando como turbina (BFT) e um motor de indução como gerador. O preço do grupo gerador nestes casos é bastante inferior ao de grupos convencionais, o que representa um aumento significativo da viabilidade econômica de uma microcentral hidrelétrica.

### Bombas Funcionando Como Turbina

Apesar de desempenharem processos opostos, quando comparados os aspectos construtivos e hidráulicos, as bombas e turbinas assemelham-se. O mesmo acontece quando a comparação é feita entre motores e geradores. A Figura 1 apresenta uma comparação entre uma bomba, onde é fornecida energia mecânica para que esta seja convertida em energia de pressão (máquina geratriz), enquanto que a turbina recebe energia de pressão, convertendo-a em energia mecânica (máquina motriz).



**Figura 1. Comparação entre a operação de uma turbina e uma bomba.**

De acordo com VIANA (2012) a grande vantagem da utilização de bombas funcionando como turbina é seu custo reduzido, que é de 2 a 3 vezes inferior aos custos de uma turbina convencional, já que são produzidas em série devido à sua ampla utilização em diversos setores como saneamento e irrigação. Por esta razão países como EUA, Alemanha e França vêm utilizando bombas e motores para gerar energia elétrica em pequenos aproveitamentos. Além do custo reduzido, a utilização dos grupos BFT's para geração de energia apresenta outras vantagens:

- Maior disponibilidade de peças de reposição;
- São simples e robustas;
- Possuem uma ampla faixa de operação, podendo ser aplicada a diferentes tipos de aproveitamentos;
- Rapidez no fornecimento do equipamento;
- Instalação mais simples;
- A bomba e o motor podem ser adquiridos em conjunto, com acoplamento direto, reduzindo as perdas na transmissão de potência através de correias, por exemplo.

Entretanto, ao contrário das turbinas convencionais, as bombas não possuem nenhum dispositivo para controle da vazão, de forma que a rotação se mantenha praticamente constante, mesmo que haja variação da demanda. Assim, é necessário que a BFT opere com vazão e altura constantes.

### **Gerador De Indução**

Assim como a bomba operando em reverso traz vantagens técnicas e econômicas, também o motor de indução pode ser utilizado como gerador elétrico. Esta aplicação é ainda mais atrativa para conjuntos motobomba do tipo “monobloco”, onde a bomba e o motor compõem um único equipamento, sem necessidade de acoplamento.

Os geradores de indução assíncronos, ou simplesmente gerador de indução são máquinas assíncronas que requerem uma fonte externa de corrente (reativa) de magnetização necessária para estabelecer o campo magnético no entreferro entre o rotor e o estator do gerador. Sem esta fonte os geradores de indução não são capazes de gerar potência elétrica, e devem operar sempre em paralelo com um sistema elétrico, uma máquina síncrona ou um capacitor que possa suprir a necessidade de reativo.

Sob algumas condições o gerador de indução pode continuar a gerar potência elétrica depois da remoção da rede elétrica. Este fenômeno, conhecido

como autoexcitação, pode ocorrer quando há capacitância em paralelo suficiente para promover a excitação da máquina e a carga conectada ter característica resistiva. Esta capacitância externa pode ser parte do sistema de geração alternativa ou podem ser capacitores para correção do fator de potência, localizados na área do sistema elétrico com o qual está interligado.

Quando conectado diretamente com a rede de distribuição os geradores de indução devem operar a uma velocidade de rotação determinada pela máquina motriz e ligeiramente maior que a velocidade necessária para o exato sincronismo. Abaixo da velocidade de sincronismo estas máquinas operam como motor de indução, e portanto se tornam uma carga no sistema elétrico ao qual está conectado. Deve ser observado que há um intervalo de rotação acima da velocidade síncrona no qual o rendimento é muito baixo. Este efeito é causado pelas perdas fixas relacionadas ao baixo nível de potência gerada nestas baixas velocidades. Outro aspecto relevante é a rotação máxima. Caso seja atingido um valor máximo estabelecido, o gerador deve ser desconectado da rede e um sistema de controle deve atuar para frear a turbina. A desconexão é necessária para a segurança elétrica do gerador no caso de uma falha e também segurança da equipe de manutenção da concessionária, que pode precisar desligar o gerador ao prestar serviços na rede.

Independente da carga, os geradores de indução solicitam potência reativa da rede e podem afetar negativamente a regulação de tensão no circuito ao qual está conectado. Portanto o gerador de indução é um consumidor de reativo do sistema. Assim, é importante considerar a adição de capacitores buscando melhorar o fator de potência e reduzir o consumo de reativo da rede.

O processo de conexão do gerador com a rede elétrica é bastante simples, e não requer um procedimento especial para sincronizar com o sistema elétrico. Tecnicamente o rotor é colocado para girar no mesmo sentido que o campo magnético está girando, o mais próximo possível da rotação síncrona para evitar choques desnecessários de velocidade e tensão. Um fenômeno similar a conexão de motores ou transformadores a rede elétrica irá resultar em uma troca transitória de potência ativa e reativa entre carga e gerador.

### **Seleção Do Grupo Gerador**

Segundo VIANA (2012), diversos autores propuseram diferentes abordagens buscando estabelecer uma metodologia de dimensionamento

da bomba e do motor. Devem-se observar alguns pontos:

- O rendimento de uma BFT e gerador de indução é inferior ou no máximo igual ao da bomba e motor.
- A BFT deve operar com vazão e queda superiores aos valores nominais da bomba para se obter o mesmo rendimento
- A rotação de trabalho será maior que a rotação nominal, principalmente na operação interligada.

Os métodos considerados mais práticos e com melhores resultados são aqueles baseados na rotação específica da bomba, onde se considera que uma bomba com a mesma rotação específica irá operar em condições de vazão e altura similares como turbina. (VIANA, 2012).

## POTENCIAL HIDRELÉTRICO EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Determinar o potencial disponível em um determinado ponto da rede de distribuição de água requer o conhecimento do sistema de tratamento e distribuição de água e também o seu funcionamento para que assim o fornecimento de água não seja prejudicado.

Os trabalhos de LIMA (2012) propõem uma metodologia para determinação do potencial hidroelétrico em um sistema de abastecimento de água, e mostrou que o potencial energético em sistemas de abastecimento de água está presente em diferentes pontos do sistema, como captações de água bruta, distribuição entre reservatórios e até mesmo diretamente na rede de distribuição, em válvulas redutoras de pressão (VRP).

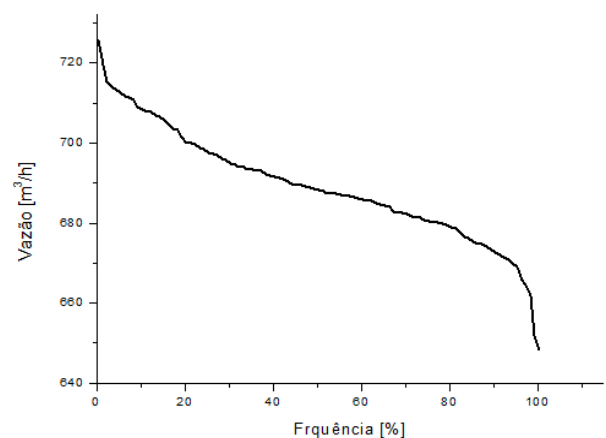
Deve-se determinar a vazão e queda disponível, de forma a operar em um ponto constante. Segundo LIMA (2012) algumas medidas podem ser tomadas visando melhorar o aproveitamento nas redes de distribuição de água:

- Utilização de by-pass e VRP em adutoras por gravidade, a fim de manter a BFT em um ponto de operação constante, aumentando a confiabilidade para o atendimento da carga;
- Alteração na operação de reservatórios que recebem água através de adutoras por gravidade, com o objetivo de maximizar a potência disponível;
- Utilizar BFTs específicas para diferentes períodos do dia no lugar de VRPs, melhorando o controle de pressão na rede.

### Vazão De Projeto

Para definir qual a vazão de projeto é necessário conhecer as variações da vazão aduzida. Para tal pode ser realizado um monitoramento através de macromedidores ou com outros equipamentos de medição de vazão, como tubos de Pitot ou sensores ultrassônicos.

Para que a vazão seja determinada com maior precisão recomenda-se que os dados coletados se estendam por um período de um ano. Caso não seja possível, podem-se utilizar os dados do período de menor consumo, que ocorre normalmente no inverno. Assim, com os dados coletados é possível criar uma curva de permanência de vazões aduzidas, como ilustra a Figura 2.



**Figura 2. Exemplo de curva de permanência de vazões**

A vazão de projeto neste caso foi definida como aquela que ocorre 100 % do tempo. Desta forma o grupo gerador, que deve ser instalado em um by-pass, irá trabalhar sempre com vazão constante, enquanto que o restante da vazão necessária é controlado na tubulação principal.

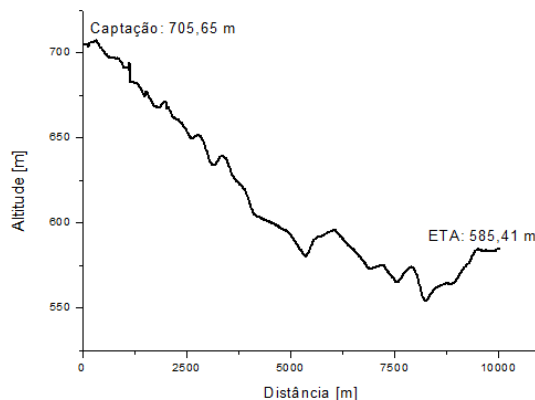
### Altura De Queda Líquida

A altura de queda líquida pode ser determinada pela medida de pressão no ponto de interesse. Caso não seja possível, pode-se obter a medida de pressão neste ponto através da diferença entre a queda bruta e as perdas de carga ao longo dos condutos.

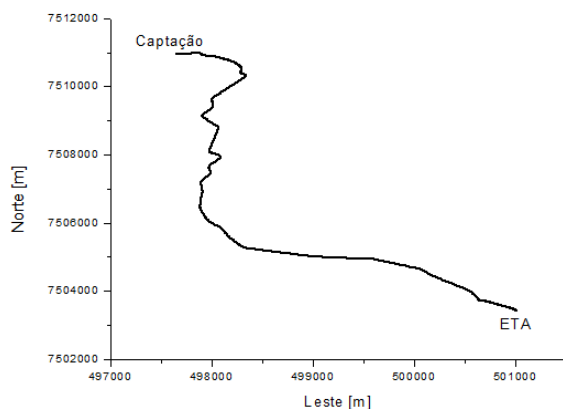
A queda bruta, bem como o perfil e o comprimento das adutoras podem ser obtidos através de levantamentos topográficos do local, utilizando equipamentos como Estação Total ou DGPS (Differential Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global Diferencial).

A Figura 3 e a Figura 4 apresentam exemplos de perfil transversal e longitudinal e as cotas de um levantamento realizado em uma adutora entre a

tomada na captação d'água e a estação de tratamento (ETA).



**Figura 3. Exemplo de perfil transversal de uma adutora.**

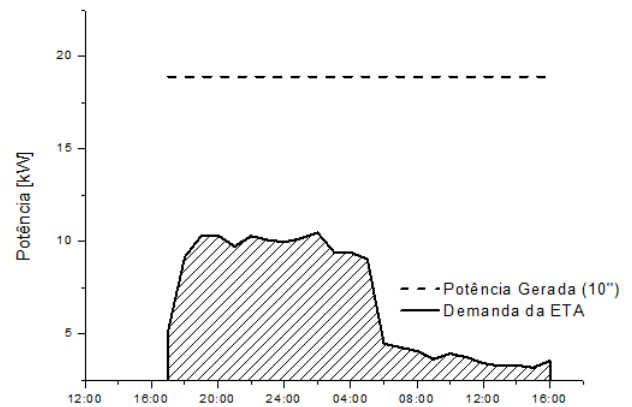


**Figura 4. Exemplo de perfil longitudinal de uma adutora.**

### Demanda De Potência Elétrica

A medição da demanda de potência permite conhecer o comportamento da carga a ser atendida pela microcentral. Caso a potência gerada seja maior que a consumida, o excedente será creditado ao consumidor, conforme sistema de Compensação de Energia. A Figura 5 ilustra a curva de carga de uma ETA, e mostrando que neste caso o potencial de geração é superior as necessidades de consumo da carga local.

A medição pode ser realizada através da instalação de analisadores de energia junto ao ponto de conexão ou quadro de distribuição de energia. Outras informações podem ser obtidas através do estudo das faturas de energia, como tarifas praticadas, histórico de consumo e encargos e sazonalidade.



**Figura 5. Exemplo de curva de carga**

## REGULAMENTAÇÃO DO ACESSO A REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO

No Brasil as condições de acesso de microgeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica são estabelecidas através da Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012, elaborada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Esta resolução complementa o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, também elaborados pela ANEEL, que trata especificamente do “Acesso ao Sistema de Distribuição”. Estes dois documentos foram revisados e alterados através da Resolução Normativa 517, de 11 de dezembro de 2012.

Neste contexto, define-se a Microgeração Distribuída como sendo qualquer central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

### Solicitação e Parecer de Acesso

O PRODIST parte do princípio que qualquer um conectado à rede de distribuição é considerado *Acessante*, seja ele consumidor, central geradora, distribuidora ou agente importador ou exportador de energia. E define como *Acessada*, a distribuidora de energia elétrica em cujo sistema elétrico o *Acessante* conecta suas instalações.

Para central geradora classificada como microgeração distribuída, são obrigatórias as etapas de solicitação de acesso e parecer de acesso. A solicitação de acesso é um requerimento formulado pelo *Acessante* à *Acessada*, que apresenta o projeto das instalações de conexão e solicita conexão ao sistema de distribuição. O parecer de acesso é um

documento apresentado pela *Acessada* que consolida os estudos e avaliações de viabilidade da solicitação de acesso requerida e que informa ao *Acessante* o ponto de conexão com suas características e condições de acesso, os cálculos e participações financeiros, as tarifas de uso aplicáveis, os prazos, o modelo de Acordo Operativo, as responsabilidades do *Acessante* e eventuais informações sobre equipamentos e cargas susceptíveis de provocar danos no sistema de distribuição.

### Sistema de Compensação de Energia Elétrica

O *Acessante* que aderir ao sistema de compensação de energia elétrica irá ceder a título de empréstimo gratuito a sua energia ativa injetada para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 36 meses.

No faturamento da unidade consumidora integrante do sistema de compensação de energia elétrica, o consumo de energia ativa a ser faturado será a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto tarifário. O excedente que não tenha sido compensado deverá ser utilizado nos ciclos de faturamento subsequentes.

Caso haja postos tarifários, ou seja, períodos de ponta ou fora de ponta, e a energia ativa injetada em um determinado posto tarifário seja superior à consumida, a diferença deverá ser utilizada para compensação em outros postos tarifários dentro do mesmo ciclo de faturamento, devendo ser observada a relação entre os valores das tarifas de energia.

### Ponto de Conexão

O ponto de conexão do *Acessante* com microgeração é o ponto de entrega da unidade consumidora e que estabelece fronteira entre as instalações do *Acessante* e da *Acessada*.

Este ponto é definido pelo critério do menor custo global. Para chegar a este custo é necessária uma avaliação de alternativas tecnicamente equivalentes para a nova conexão, onde será escolhida aquela de menor custo global de investimentos, considerando as instalações de conexão de responsabilidade do *Acessante*, os reforços nas redes de distribuição e transmissão e os custos das perdas elétricas.

A escolha do ponto de conexão implica na escolha do nível de tensão de conexão do *Acessante*, devendo ser consideradas as faixas de potência apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2. Níveis de tensão**

Potência Instalada	Nível de Tensão de Conexão
< 10 kW	Baixa Tensão (monofásico, bifásico ou trifásico)
10 a 75 kW	Baixa Tensão (trifásico)
75 a 500 kW	Baixa Tensão (trifásico) / Média Tensão

### Sistema de Proteção

O sistema de proteção deve ser projetado para proteger tanto a geração distribuída contra falhas originadas na rede, como também proteger a rede contra falhas originadas no sistema de geração. A Tabela 3 indica os requisitos mínimos do ponto de conexão da microgeração distribuída para potências até 100kW.

**Tabela 3. Requisitos mínimos em função da potência instalada**

Equipamento	
Elemento de desconexão.	Sim
Elemento de interrupção.	Sim
Transformador de acoplamento.	Não
Proteção de sub e sobretensão.	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência.	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente.	Não
Proteção contra desequilíbrio de tensão.	Não
Sobrecorrente direcional.	Não
Sobrecorrente com restrição de tensão.	Não
Relé de sincronismo.	Sim
Anti-ilhamento.	Sim
Estudo de curto-circuito.	Sim

### Ilhamento

O esquema de operação ilhado é caracterizado pela carga sendo suprida unicamente através de geração distribuída, resultando em um subsistema de distribuição isolado do restante do sistema, chamado de microrrede.

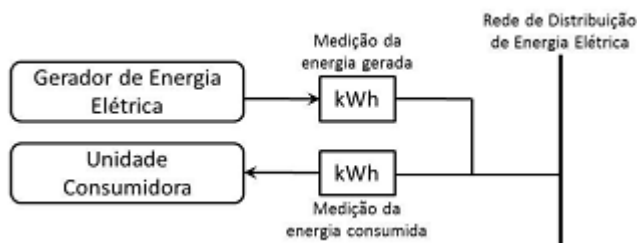
Para operação ilhada devem ser feitas uma série de estudos e avaliações técnicas para que as condições de qualidade da energia sejam garantidas. O resultado fará parte do acordo operativo, contendo as condições e instruções para a situação e quais as normas de segurança necessárias.

Como citado na Tabela 3, as conexões de microgeração distribuída devem dispor de um sistema automático de detecção de ilhamento aliado ao equipamento que desfaz o paralelismo, desconectando a geração da rede quando necessário. Isto porque a ilha pode deixar o sistema instável,

assim, se ganha em continuidade do fornecimento de energia, mas se perde em qualidade de energia. Além disso, esta instabilidade pode ser prejudicial a equipamentos, causando prejuízos ainda maiores do que a interrupção no seu fornecimento.

### Medição

O sistema de medição para microgeradores deve atender às mesmas especificações exigidas para unidades consumidoras conectadas no mesmo nível de tensão, mas acrescido da funcionalidade de medição bidirecional de energia elétrica ativa. Para instalações em baixa tensão, a medição bidirecional pode ser realizada utilizando dois medidores unidirecionais: um para medir a energia elétrica ativa consumida e outro para a gerada, como apresenta a Figura 6.



**Figura 6. Arranjo de medidores unidirecionais**

### Qualidade da Energia

Os procedimentos relativos a níveis de tensão e frequência, fator de potência, harmônicos, flutuações e variações de tensão, o Acessante deve seguir o Módulo 8 do PRODIST, que aborda a qualidade da energia elétrica.

Com relação às distorções harmônicas o valor de referência em baixa tensão é de 10% para distorção harmônica total de tensão. As correntes harmônicas causam problemas tanto no sistema de distribuição de energia como na instalação, por exemplo: sobreaquecimento de cabos e equipamentos, diminuição do desempenho de motores, operação errônea de disjuntores, relés e fusíveis, etc.

### Frequência

O sistema de microgeração deve, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Em caso de distúrbios, deve obedecer ao constante da Tabela 4, de acordo com o PRODIST em seu Módulo 8.

**Tabela 4. Requisitos de Operação da Frequência**

Frequência no Ponto de Conexão	Tempo Máximo de Desligamento
$f < 57,5$	5 s
$57,5 < f < 58,5$	10 s
$58,5 < f < 59,5$	30 s
$59,5 < f < 60,5$	Faixa aceitável de operação.
$60,5 < f < 63,5$	30 s
$f > 63,5$	10 s

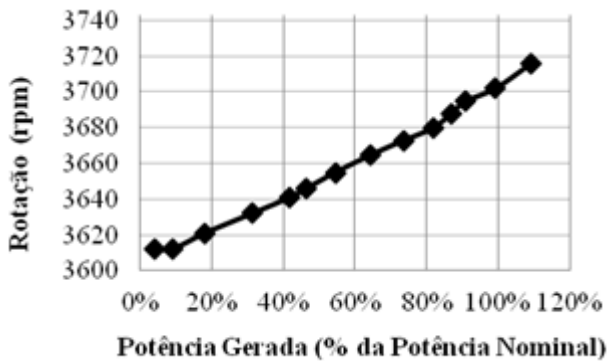
### ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de analisar o comportamento do grupo gerador bomba funcionando como turbina e gerador de indução operando interligado a rede elétrica, foram realizados testes em uma bancada montada junto ao LHPCH – Laboratório Hidráulico de Pequenas Centrais Hidrelétricas, da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

A bancada consiste de um conjunto motobomba de 3cv (2,2 kW) funcionando como turbina e gerador de indução conectado a rede elétrica trifásica, com tensão nominal de 220V. O circuito hidráulico da bancada possui ainda um outro conjunto motobomba acionado por inversor de frequência, este com a função de fornecer a potência hidráulica ao grupo gerador, permitindo variar parâmetros de entrada da turbina (vazão e pressão).

O grupo gerador foi conectado a rede elétrica do próprio laboratório. Variando os parâmetros de entrada da turbina, o grupo gerador foi levado à rotação síncrona, quando foi interligado a rede elétrica através de um disjuntor. A partir deste ponto a variação da rotação leva ao controle da potência gerada.

As grandezas elétricas foram medidas através de um analisador de energia instalado no ponto de conexão. Foi utilizado ainda um tacômetro ótico para medição da velocidade de rotação do eixo. A Figura 7 apresenta os pontos de rotação de acordo com a potência.



**Figura 7. Velocidade de rotação de acordo com a potência gerada**

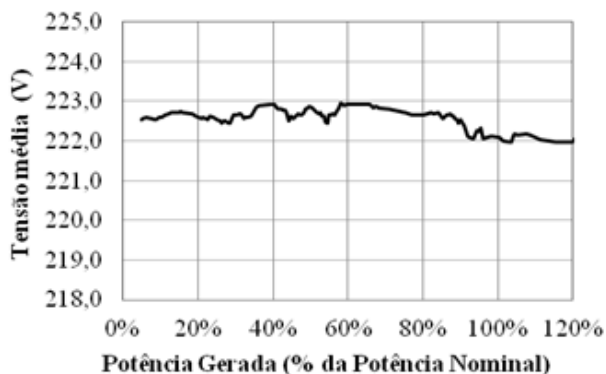
### Níveis de Tensão

Os requisitos de operação da tensão para instalações atendidas em 220V são apresentados na Tabela 5. Requisitos de Operação da Tensão. Tabela 5.

**Tabela 5. Requisitos de Operação da Tensão.**

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão (V)
Crítica	$V < 189$ V
Precária	$189 < V < 201$ V
Adequada	$201 < V < 231$
Precária	$231 < V < 233$
Crítica	$V > 233$

A Figura 8 mostra a variação tensão no ponto de conexão se manteve adequada em todos os pontos levantados.



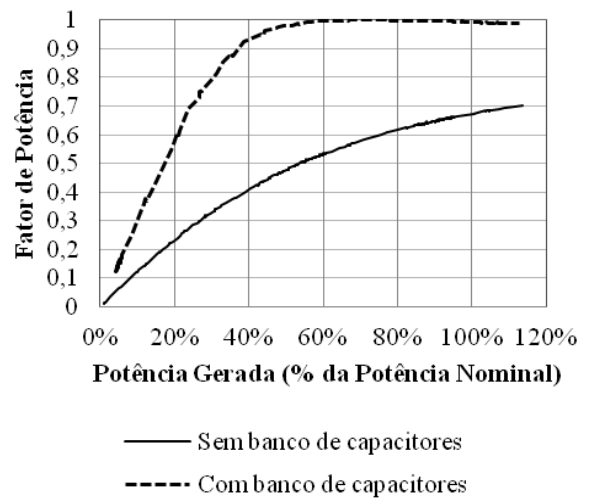
**Figura 8. Variação da tensão**

### Fator de Potência

A principal característica do gerador de indução assíncrono é a necessidade de uma fonte externa de energia reativa para seu funcionamento. Na operação

interligada, a energia reativa necessária é suprida pela rede elétrica, mas pode resultar em baixos valores de fator de potência. Neste caso um banco de capacitores pode ser utilizado suprir parte do reativo necessário para corrigir o fator de potência para níveis aceitáveis. Um banco trifásico de capacitores foi dimensionado buscando obter um valor de fator de potência dentro dos limites estabelecidos (entre 0,92 e 1,00).

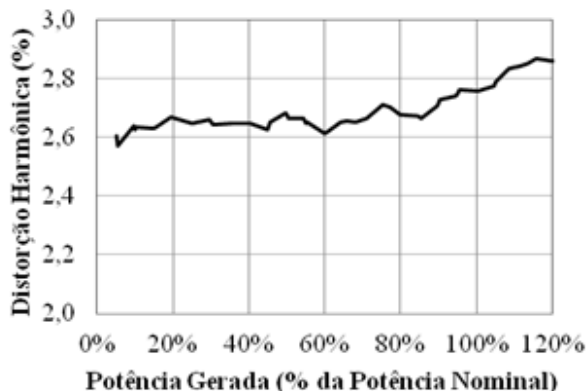
A Figura 9 apresenta o gráfico das medidas do fator de potência de acordo com a potência gerada, onde se observa que sem a utilização de bancos de capacitores o fator de potência na potência nominal é de 0,67. Já com banco de capacitores o fator de potência foi de 0,98.



**Figura 9. Correção do fator de potência com banco de capacitores**

### Qualidade da Energia

O gerador de indução não prejudica a rede elétrica com relação a distorções harmônicas, no está sujeito as condições da rede elétrica. Nos testes realizados observou-se variação da distorção harmônica total de tensão, no entanto esta foi atribuída as condições da rede de distribuição do laboratório, a qual inclui o inversor de frequência utilizado na bancada. A Figura 10 mostra esta variação, que se manteve bem abaixo da referência em baixa tensão que é de 10%.



**Figura 10. Distorção Harmônica de Tensão**

Observou-se ainda que transitórios hidráulicos podem levar a oscilações na rede elétrica. Ressalta-se assim a necessidade do correto dimensionamento do grupo gerador com base no conhecimento do comportamento do sistema, que deve ser constante.

### Frequência

Assim como a tensão, na operação interligada a frequência é imposta pelo sistema elétrico interligado. Como ilustra a Figura 11, os valores de frequência se mantiveram dentro dos limites estabelecidos para regime permanente, entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.



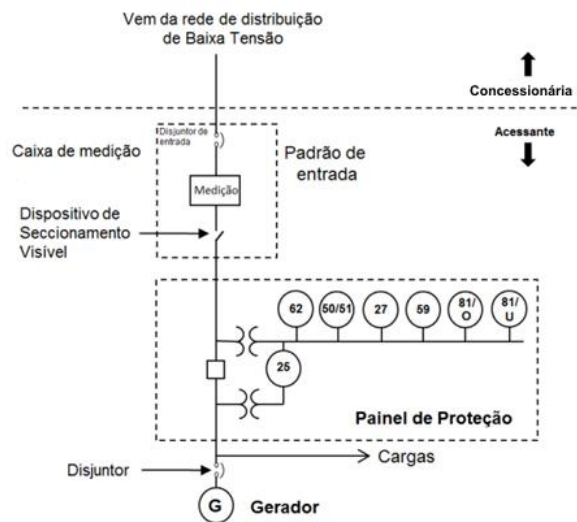
**Figura 11. Variação da frequência**

### Proteção

As microcentrais distribuídas deverão possuir as proteções mínimas previstas na Tabela 3. Além destas as distribuidoras de energia podem estabelecer suas próprias especificações técnicas para acesso a sua rede de distribuição. A Figura 12 apresenta um diagrama unifilar proposto para a conexão de sistemas de microgeração, onde se verifica as seguintes funções de proteção:

Figura 12. Diagrama unifilar da conexão com a rede de distribuição.

- Verificação de sincronismo (25)
- Temporizador de religamento (62)
- Sobrecorrente instantâneo/temporizado (50/51)
- Subtensão (27)
- Sobretensão (59)
- Subfrequência (81/O)
- Sobrefrequência (81/U)



**Figura 12. Diagrama unifilar da conexão com a rede de distribuição.**

Percebe-se a necessidade de relés de sincronismo para garantir que o paralelismo seja feito nas condições ideais e um relé de tempo de reconexão que só permita que o paralelismo seja refeito após o tempo de reconexão definido. É obrigatória a instalação de um Dispositivo de Seccionamento Visível – DSV entre o seu sistema e o sistema da distribuidora, capaz de encerrar o paralelismo entre ambos. Deve ser capaz de realizar manobra sob carga e ser instalado de forma que fique acessível à distribuidora para eventual necessidade de desconexão durante manutenção em seu sistema.

No caso das microcentrais hidrelétricas, deve ser previsto ainda um sistema de proteção mecânica, responsável por interromper o fluxo de água na ocasião de falhas ou manutenção. Esta proteção pode ser feita através de válvula na entrada do grupo gerador BFT, ou através de comporta instalada na entrada do conduto.

O gerador de indução assíncrono apresenta ainda uma proteção natural ao ilhamento. Uma vez que depende da rede elétrica para suprimento de reativo, caso haja o desligamento o grupo gerador também deixará de fornecer energia. Com o uso de banco de capacitores a proteção deve ser ajustada para garantir os níveis adequados de tensão.

## CONCLUSÕES

Nos estudos realizados foi constatado que nos sistemas de captação, tratamento e distribuição de água existe um potencial hidrelétrico a ser aproveitado. Devido à existência de componentes de uma central, tais como câmara de carga e condutos forçados os custos de instalação podem ser reduzidos.

O uso de grupos motobomba operando como geradores é uma alternativa viável técnica e economicamente, no entanto sua especificação e seleção requer conhecimento de parâmetros da rede de água, para que esta opere com vazão e pressão estáveis e permitam cessar o fluxo de água em caso de atuação da proteção elétrica ou serviços de manutenção.

Através de testes em laboratório foi analisado o comportamento de um grupo gerador BFT fornecendo energia a uma rede elétrica de distribuição. Comprovou-se que o gerador de indução apresenta vantagens para operação interligada, como a facilidade de sincronismo e robustez. Sua operação não afetou a qualidade da energia da rede com relação a distorções harmônicas, níveis de tensão e de frequência. Ficou comprovada a necessidade da utilização de banco de capacitores para correção de fator de potência mostrou-se necessária para atingir os limites especificados.

Por fim, este trabalho contribui na disseminação das microcentrais hidrelétricas como uma grande oportunidade de eficiência energética e uso racional de energia no setor de saneamento.

## BIBLIOGRAFIA

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2012), Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.
- ELETOBRÁS (1999), Diretrizes para Estudos e Projetos Básicos de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH, Rio de Janeiro, RJ.
- LIMA, G.M. (2013). Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, UNIFEI. Itajubá, MG, Brasil.
- LIMA, G.M., VIANA, A.N.C., OLIVEIRA, K.C.F. (2012). Metodologia Para Avaliação Do Potencial Energético Em Sistemas De Abastecimento De Água Com Captação Por Gravidade - Estudo de Caso no SAAE Cruzeiro. SEREA, 2012.
- SIMÕES, M.G. (2004). Renewable Energy Systems: Design and analysis with induction generators. CRC Press.
- VIANA, A.N.C. (2012) . Bombas Funcionando como Turbina. Itajubá, Minas Gerais: Editora ACTA.